PREDGOVOR

Istorijski gledano, sa razvojem prvih civilizovanih društava ukazala se potreba za merenjima. Građevinarstvo i trgovina bile su prve aktivnosti kod kojih su se koristila merenja. Međutim, razvojem nauke i tehnike, merenje je postalo neizostavno u mnogim drugim oblastima. Razvoj nauke i tehnike uvek je bio tesno vezan sa merenjima. Kao što su naučna i tehnološka dostignuća uticala na razvoj mernih sistema i metoda, tako je i merenje prirodnih pojava i fenomena dovodilo do nastanka mnogih naučnih otkrića i tehnoloških rešenja.

Jedna od naučnih oblasti gde je merenje našlo veliku primenu je elektrotehnika. Još od druge polovine 19. veka sa razvojem industrije javila se potreba za merenjem struja i napona. Od tada pa do danas električna merenja su prešla dug put od glomaznih mernih uređaja pa do sofisticiranih automatizovanih sistema koji mogu da obave veliki broj merenja u jedinici vremena.

Cilj električnih merenja nije da samo kvantifikuju neku električnu pojavu. Na osnovu merenja može se vršiti upravljanje i kontrola velikih sistema kao što su elektroenergetski sistemi. Merenja mogu da omoguće siguran i optimalan rad sistema čime se mogu ostvariti velike novčane uštede.

Namena ove knjige je da se kroz teoriju i praktične primere oblast električnih merenja približi čitaocima. Knjiga je prvenstveno namenjena studentima Elektrotehničkog fakulteta Odseka za energetiku kao osnovni udžbenik za predmet Električna merenja 1. Međutim, ona može da posluži kao dodatna literatura za sve one koji se bave oblašću električnih merenja. Knjiga je organizovana u osam poglavlja. U uvodnim poglavljima obrađene su opšte teme kao što su osnovni pojmovi o merenju, greške mernih sredstava, statistička obrada rezultata merenja. U nastavku knjige obrađeni su električni instrumenti kao i metode za merenje električnih veličina i parametara. Poslednje poglavlje posvećeno je virtuelnim instrumentima, koji danas predstavljaju savremen način za merenje električnih veličina i parametara. Pored teorije, knjiga sadrži veliki broj rešenih računskih zadataka koji predstavljaju realne probleme iz oblasti električnih merenja. Namera je da čitaoci pored teorijskih steknu i praktična znanja.

Potrebno je reći da u knjizi nisu obrađene neke bitne teme kao što su pametna brojila, SCADA sistemi, dok su elektronski instrumenti i osciloskopi u knjizi obrađeni na informativnom nivou bez ulaženja u detalje. Takođe, ovom knjigom nisu obuhvaćeni merni transformatori, merenja magnetskog polja, magnetske indukcije i

fluksa. Sve navedene teme nisu po planu i programu predmeta Električna merenja 1 i biće predmet neke buduće knjige.

Na kraju autori se posebno zahvaljuju recenzentima prof. dr Jovanu Mikuloviću i docentu dr Tomislavu Rajiću koji su pažljivo pročitali rukopis knjige i dali korisne sugestije i samim tim doprineli da ova knjiga bude još bolja.

Autori

SADRŽAJ

1 OSNOVNI POJMOVI O MERENJIMA 1

1.1 Uvod 1

1.2 Međunarodni sistem jedinica 2

1.3 Principi merenja 4

1.3.1 Planiranje merenja 5

1.3.2 Izbor mernog sredstva 5

1.3.3 Merni proces 6

1.3.4 Merni postupci 8

1.3.5 Merne metode 8

1.4 Merna sredstva (merila) 9

1.4.1 Merni pribor 10

1.4.2 Merni instrumenti 10

1.4.3 Merni pretvarači 11

1.5 Metrološke karakteristike mernih sredstava 11

1.5.1 Upotrebne karakteristike 11

1.5.2 Statičke karakteristike 12

1.5.3 Dinamičke karakteristike 15

1.6 Etaloni 21

1.6.1 Etaloni napona 21

1.6.2 Merni otpornici 24

1.6.3 Merni kondenzatori 26

1.6.4 Merne prigušnice (kalemi) 27

2 GREŠKE MERNIH SREDSTAVA 29

2.1 Greška pokazivanja 29

2.2 Apsolutna greška mernog sredstva 30

2.3 Relativna greška mernog sredstva 31

2.4 Svedena greška mernog instrumenta 31

2.5 Najveća dopuštena greška mernog sredstva 31
2.6 Klasa tačnosti mernog sredstva 32
2.7 Overa mernih instrumenata 33
2.7.1 Postupak overe 33
2.7.2 Overa ampermetra i voltmetra poređenjem 34
3 STATISTIČKA OBRADA REZULTATA MERENJA 37
3.1 Uvod 37
3.2 Osnovne veličine iz statističke obrade podataka 38
3.2.1 Srednja vrednost i standardno odstupanje rezultata merenja 38
3.2.2 Srednja vrednost i standardno odstupanje uzorka 39
3.2.3 Tačnost, ponovljivost i reproduktivnost rezultata merenja 40
3.3 Prikaz rezultata merenja pomoću histograma 40
3.4 Funkcije raspodele 44
3.4.1 Gausova (normalna) raspodela 46
3.4.2 Uniformna (ravnomerna) raspodela 51
3.4.3 Simetrična trougaona funkcija raspodele 53
3.4.4 Weibull-ova raspodela 54
3.4.5 Beta raspodela 55
3.4.6 Standarno odstupanje indirektno merenih veličina 55
3.5 Merna nesigurnost 57
3.5.1 Merna nesigurnost tip A 59
3.5.2 Merna nesigurnost tip B 59
3.6 Regresiona analiza 60
3.6.1 Linearna regresija 61
3.6.2 Kvadratna regresija 64
3.7 Prezentacija merenih podataka 64
3.7.1 Tabelarna predstava podataka 65
3.7.2 Grafička predstava podataka 65
3.8 Rešeni primeri 66
4 ELEKTRIČNI SIGNALI 81

4.1 Klasifikacija električnih mernih signala 81
4.2 Osnovni parametri i karakteristike električnih signala 82
4.3 Izvori električnih signala 88
4.4 Izvori električnih smetnji pri merenjima 89
4.4.1 Smetnje na ulazu mernih instrumenata 89
4.4.2 Parcijalne smetnje 91
4.5 Pojam elektromagnetske kompatibilnosti 94
4.6 Rešeni primeri 94
5 ELEKTRIČNI MERNI INSTRUMENTI 107
5.1 Uvod 107
5.2 Opšte karakteristike električnih instrumenata 108
5.2.1 Princip rada 108
5.2.2 Konstruktivni elementi električnih mernih instrumenata 110
5.3 Magnetoelektrični instrumenti sa kretnim kalemom 115
5.3.1 Ampermetar sa pokretnim kalemom 121
5.3.2 Voltmetar sa pokretnim kalemom 122
5.4 Magnetoelektrični instrumenti za merenje naizmeničnih veličina 124
5.4.1 Magnetoelektrični instrumenti za usmeračom 124
5.4.2 Magnetoelektrični instrumenti za termopretvaračem 131
5.5 Elektromagnetni instrumenti sa kretnim gvožđem 132
5.6 Elektrodinamički merni instrumenti 137
5.6.1 Elektrodinamički ampermetar 143
5.6.2 Elektrodinamički voltmetar 144
5.6.3 Elektrodinamički vatmetar 146
5.6.4 Elektrodinamički varmetar 147
5.6.5 Sistematska greška pri merenju snage vatmetrom 148
5.6.6 Overa vatmetra 149
5.7 Elektrostatički instrumenti 153
5.8 Indukcioni instrumenti 160
5.8.1 Indukcioni ampermetar 164

5.8.2 Indukcioni voltmetar 165
5.8.3 Indukcioni vatmetar i varmetar 165
5.8.4 Indukciono brojilo električne energije 166
5.9 Referentni uslovi rada električnih mernih instrumenata 170
5.10 Elektronski merni instrumenti 171
5.11 Digitalni merni instrumenti 174
5.12 Osciloskopi 175
5.12.1 Analogni osciloskopi 176
5.12.2 Savremeni digitalni osciloskopi 178
5.12.3 Merne sonde 179
6 MERNI MOSTOVI I KOMPENZATORI 180
6.1 Merni mostovi 180
6.1.1 Opšta konfiguracija mernog mosta 180
6.1.2 Mostovi za jednosmernu struju 182
6.1.3 Mostovi za naizmeničnu struju 184
6.2 Kompenzatori 187
6.2.1 Pogendorfov kompenzator 189
6.2.2 Butijev kompenzator 191
6.2.3 Delilo napona 193
7 MERENJE ELEKTRIČNIH PARAMETARA I VELIČINA 195
7.1 Merenje električnog otpora 195
7.1.1 Merenje otpora merenjem napona i struje (*U–I* metoda) 195
7.1.2 Merenje otpora metodom mosta 198
7.1.3 Merenje otpora pomoću kompenzatora 206
7.1.4 Merenje otpora pomoću voltmetra i poznatog otpora 207
7.1.5 Merenje otpora pomoću ampermetra i poznatog otpora 209
7.1.6 Merenje velikih otpora pomoću voltmetra 210
7.1.7 Merenje otpora pomoću megometra 211
7.1.8 Merenje otpora pomoću logometra 213
7.2 Merenje induktivnosti 215

7.2.1 Merenje sopstvene induktivnosti *U–I* metodom 216
7.2.2 Merenje sopstvene induktivnosti kalema sa gvožđem (*P–I* metoda) 217
7.2.3 Merenje sopstvene induktivnosti rezonantnom metodom 219
7.2.4 Merenje sopstvene induktivnosti metodom mosta 224
7.2.5 Merenje međusobne induktivnosti *U–I* metodom 228
7.2.6 Merenje međusobne induktivnosti Kembelovom metodom 229
7.2.7 Merenje međusobne induktivnosti metodama za merenje sopstvene induktivnosti 231
7.3 Merenje kapacitivnosti 231
7.3.1 Vinov most 232
7.3.2 Šeringov most 233
7.4 Merenje učestanosti (frekvencije) 236
7.4.1 Merenje učestanosti primenom mehaničke rezonanse 236
7.4.2 Merenje učestanosti primenom električne rezonanse 238
7.4.3 Merenje učestanosti primenom mosta 238
7.5 Merenje napona i struje 240
7.5.1 Merenje niskih napona i malih struja 240
7.5.2 Merenje velikih struja 240
7.5.3 Merenje visokih napona 242
7.6 Merenje snage u električnim kolima 244
7.6.1 Merenje snage u DC kolima primenom *U–I* metode 244
7.6.2 Merenje snage u DC kolima primenom kompenzatora 246
7.6.3 Merenje snage metodom tri voltmetra 248
7.6.4 Merenje snage metodom tri ampermetra 250
7.6.5 Merenje snage u trofaznim sistemima 251
7.7 Merenje energije u električnim kolima 264
7.8 Rešeni primeri 266
8 VIRTUELNI INSTRUMENTI 317
8.1 Uvod u *LabVIEW* 317
8.2 *LabVIEW* okruženje 318

8.2.1 Pokretanje *LabVIEW* programa 318
8.2.2 Korisnički interfejs - *Front panel* 319
8.2.3 Grafički kôd - *Block diagram* 320
8.2.4 Palete za rad u *LabVIEW*-u 320
8.2.5 Statusna linija 321
8.2.6 Tehnike pronalaženja i rešavanja greški i nedostataka 321
8.2.7 Pomoć pri radu 322
8.2.8 Kreiranje virtuelnog instrumenta za generisanje, analizu i prikaz signala 324
8.3 Elementi tipičnih *LabVIEW* programa 329
8.3.1 Tipovi podataka u *LabVIEW* programskom paketu 329
8.3.2 Čvorovi u *Block diagram*-u 330
8.3.3 Vrste i tipovi funkcija 331
8.3.4 Prikazivanje rezultata na *Front panel*-u 332
8.3.5 *While* i *For* petlje 333
8.3.6 Donošenje odluka 334
8.3.7 Pristup podacima iz prethodne petlje 335
8.3.8 Integrisanje tekstualnog koda u *Block diagram* 335
8.3.9 Grupisanje podataka nizova 335
8.3.10 Rad sa ulaznim i izlaznim fajlovima 336
8.4 Merenje i akvizicija signala 337
8.4.1 Merni pretvarači i prilagođavači 337
8.4.2 Uređaji za merenje i akviziciju signala 338
8.4.3 Akvizicija podataka u *LabVIEW* programu 340
8.4.4 Primer kreiranja virtuelnog voltmetra 340
LITERATURA 342